

Information systems modeling

UDC 621.3

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.03>

Aleksandr Serkov, Vitaliy Breslavets, Igor Yakovenko, Andrii Fomenko

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

EXCITATION OF MAGNETOPLASMA OSCILLATIONS IN SEMICONDUCTOR STRUCTURES BY FLUXES OF CHARGED PARTICLES

Abstract. The **subject** of the papers is the processes of analysis and physical model of excitation (amplification) of magnetoplasma oscillations (helicons) by fluxes of charged particles (electrons) in the presence of a constant magnetic field. This model is based on the Cherenkov mechanism for converting kinetic energy of particles into the energy of natural electromagnetic oscillations of solid-state (semiconductor) structures under resonance conditions when the particle velocities coincide with phase velocities of oscillations. The **aim** here is to justify the formulation of theoretical studies basing on the proposed physical model of generation (amplification) of electromagnetic oscillations (emergence of oscillation instabilities, i.e., exponential growth of their amplitude). We define parameters intervals for the external magnetic field, particle fluxes and types of semiconductor structures which this physical model is applied to. We perform theoretical study of the influence charged particle fluxes have on waveguide characteristics of semiconductor structures. The study justifies the possibility of generation and amplification of magnetoplasma oscillations in the submillimeter range. Our **objectives** are theoretical studies of the interaction of moving charges with electromagnetic oscillations of a semiconductor structure under conditions of Cherenkov radiation. The **methods** used are the method of successive approximations for solving the dispersion equations for a system of charged particle flux - semiconductor structure within the framework of hydrodynamic approach. The following **results** are obtained: Theoretical studies of the functioning of semiconductor components of electrical radio equipment in the presence of charged particle fluxes have been carried out. It is shown that the effect of the particle flux is characterized by the emergence of oscillation instabilities in the semiconductor structure. We have determined one of the mechanisms for the excitation of magnetoplasma oscillations based on the interaction of moving charges with the intrinsic fields of the structures that constitute a semiconductor unit. Such equipment failures occur under conditions of Cherenkov radiation. We have shown that this interaction leads to appearance of a mode of oscillation generation. The results of a comparative analysis of the data obtained in this work make it possible to use the proposed physical model to determine the criteria for the occurrence and development of instabilities of magnetoplasma oscillations. **Conclusions.** The results obtained in this work can be used in the development of active microwave range devices (amplifiers, generators and transducers of electromagnetic oscillations of the millimeter and submillimeter bands). The comparative analysis of quantitative estimates of the growth rates of oscillation instabilities, depending on the spatial configuration of the acting field (when induced current is parallel to the structure boundary), carried out in this work, provides a solution to the problem of optimizing the operating characteristics of active microwave devices.

Keywords: charged particle flux; electromagnetic radiation; semiconductor structures; surface vibrations; vibration instability increment.

Introduction

Studies of the possibilities of exciting surface plasma oscillations by a flux of charged particles moving along the surface of a conducting solid were carried out within the framework of the hydrodynamic approach in [1-9]. In these studies, it was assumed that the behavior of the beam particles is of a collective nature, i.e. the energy of its own (plasma) oscillations can be converted into the energy of oscillations of the medium.

In this section, we discuss the kinetic mechanisms of this kind of interaction, which are independent from the collective properties of the beam particles, are partially individual by nature and are caused by resonance relations between the phase velocities of the excited waves and the velocity of the beam particles. The interest in such studies is justified by a number of reasons. First, the objects of excitation are waves whose phase velocities are less than their volumetric velocities, which expands the possibilities of excitation of such waves in conducting solids, where the drift velocities are small. In addition, sources of electromagnetic radiation can be created in a vacuum, where the carrier velocities are an order of magnitude higher than the drift velocities. Finally, the use of third-party sources expands the possibilities of exciting various types of electromagnetic oscillations since the choice of a

source can be determined by their polarization. In this paper, we develop a kinetic theory of interaction of surface electromagnetic oscillations with sources of electromagnetic radiation that move along the interface. We also propose a method to determine probabilities with which particles emit or absorb oscillation energy and formulate kinetic equations that describe the change in the number of surface oscillations.

Task solution

Let us consider the interaction of a helicon and a particle moving in a magnetoactive plasma along a helical trajectory relative to a constant magnetic field [8]. We choose the coordinate system in such a way that the OZ axis is parallel to the direction H_0 along which the particle moves with constant speed v_{0z} . The velocity components along X and Y axes are respectively equal to:

$$v_{0x} = -R\omega_H \sin \omega_H t, v_{0y} = -R\omega_H \cos \omega_H t, \quad (1)$$

where R – Larmor radius, ω_H – cyclotron frequency of an electron with charge e and mass m .

A charged particle creates current in the plasma, the density of which is determined by the equation:

$$\vec{j} = e\vec{v}\delta(x-x_0)\delta(y-y_0)\delta(z-v_{0z}t), \quad (2)$$

where $x_0 = R \cos \omega_H t$, $y_0 = -R \sin \omega_H t$. (3)

The system of equations describing the interaction of a particle with a helicon in magnetized plasma has the following form:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}; \quad \vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{u} \vec{H}_0] = 0; \\ \operatorname{rot} \vec{H} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}; \quad \vec{D} = 4\pi e n_0 \int_{-\infty}^t \vec{u} dt, \end{aligned} \quad (4)$$

where \vec{u} is the velocity of the conduction electrons of the medium and n_0 is their concentration. Using the Fourier expansion, we represent the electromagnetic field created by a particle as a set of space-time harmonics. For example, the strength of the electric field in a medium at an arbitrary point \vec{r} at a time t is determined by the equation:

$$E(\vec{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \int d\vec{q} E(\omega, \vec{q}) e^{i(\vec{q}\vec{r} - \omega t)}, \quad (5)$$

where \vec{q} is the wave vector, ω is the wave frequency. Taking the value of the electric field strength at the point where the charged particle is located, i.e. at the point $\vec{r} = \vec{r}_0(t)$, $\vec{r}_0(t) = (x_0, y_0, v_{0z}t)$ and using the equation to find the energy loss of a particle per unit time

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = e\vec{v}\vec{E}\Big|_{\vec{r}=\vec{r}_0(t)}, \quad (6)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{ieR\omega_H}{2} \times \quad (7)$$

we get:

$$\times \int \begin{bmatrix} E_+(\omega, \vec{q}) e^{i\omega_H t} - \\ -E_-(\omega, \vec{q}) e^{-i\omega_H t} \end{bmatrix} e^{i(\vec{q}\vec{r}_0 - \omega t)} d\omega d\vec{q}.$$

After integration over ω we get:

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{i(eR\omega_H)^2}{\pi c^2} v_{0z} \times \\ &\times \int_0^{\infty} q_{\perp} J_1^2(q_{\perp} R) dq_{\perp} \times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{q_z dq_z}{q_{\perp}^2 + q_z^2 - \tilde{q}_0^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

where $\tilde{q} = q_0 + iq'_0$; $q_0 = \frac{4\pi e n_0 v_{0z}}{H_0 c}$; $q'_0 = \frac{2\pi n_0 m v_{0z} v}{H_0^2}$,

$q_0 \gg q'_0$. Here q_0 is the value of the wave vector of the helicon under the conditions of Vavilov-Cherenkov resonance $\omega_q = q_z v_{0z}$, where $\omega_q = qq_z H_0 c / (4\pi e n_0)$.

Assuming $q_0 R \ll 1$, find the loss of a particle at Vavilov-Cherenkov radiation of helicons:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{e^2 R^4 \omega_H^2 q_0^4 v_{0z}}{32c^2}. \quad (9)$$

If we introduce the magnetic moment generated by a charged particle rotating in the plane XY , $M_{0z} = mv_{\phi}^2 / (2H_0)$ where $v_{\phi}^2 = v_{0x}^2 + v_{0y}^2 = R^2 \omega_H^2$ then equation (9) takes the following form:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{M_{0z}^2 q_0^4 v_{0z}}{8}. \quad (10)$$

So the energy a particle loses during emission of Vavilov-Cherenkov helicons can be interpreted as interaction of a magnetic dipole with the magnetic field of the wave created by the dipole. Knowing the energy losses due to emission of Vavilov-Cherenkov helicons, we define the collisionless damping of these waves. For this purpose, for $q_{\perp} R \ll 1$, we rewrite equation (9) as:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \sum_q \frac{d\varepsilon_q}{dt}. \quad (11)$$

Changes in the number of bosons (helicons) per unit time resulted from their interactions with conduction electrons $n_{\vec{k}}$ being in the state $\vec{k} = m\vec{v}/h$ can be calculated by the kinetic equation:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_{\vec{q}}}{\partial t} &= \frac{2\pi}{h} \sum_{\vec{k}_1, \vec{k}_2} |W_{\vec{k}_1, \vec{q}, \vec{k}_2}|^2 \delta(E_1 - E_2 - \hbar\omega_{\vec{q}}) \times \\ &\times \left[(N_q + 1) n_{\vec{k}_1} (1 - n_{\vec{k}_2}) - N_q n_{\vec{k}_2} (1 - n_{\vec{k}_1}) \right]; \quad (12) \\ \vec{k}_2 &= \vec{k}_1 - \vec{q} \end{aligned}$$

where $N_{\vec{q}}$ is the number of helicons in a state with a wave vector \vec{q} ; $\hbar\omega_{\vec{q}}$ is the energy of the quantum of the electromagnetic field of the helicon; $W_{\vec{k}_1, \vec{q}, \vec{k}_2}$ is the matrix element of the Hamiltonian of the interaction of electromagnetic oscillations and electrons. The first term in (8) determines the probability of transitions per unit time such that an electron from a state with energy E_1 transits to a state with energy E_2 with emission of a quantum of energy of electromagnetic field $\hbar\omega_{\vec{q}}$; the second term is the transition with the absorption of the quantum. The collisionless damping of the helicon γ is equal to:

$$\gamma = \frac{1}{2N_{\vec{q}}} \frac{\partial N_{\vec{q}}}{\partial t}. \quad (12)$$

Consider the interaction of helicons with an electron beam, the distribution function of which is described by the expression:

$$f_b(\vec{p}) = \frac{n_{0b}}{(2\pi m T_b)^{3/2}} \times \exp\left(-\frac{(\vec{p} - \vec{p}_0)^2}{2m T_b}\right), \quad (13)$$

where n_{0b} is electron density in a beam, T_b is their temperature in energy units and $\vec{p}_0 = (p_{0x}, p_{0y}, p_{0z})$ is constant. When $p_{0x} = p_{0y} = 0$, decrement (increment) of helicons is equal to:

$$\gamma_1 = \gamma_0 \frac{n_{0b}}{n_0} \sqrt{\frac{m T_b}{m_e T}} \left(1 - \frac{q_z v_{0z}}{\omega_q}\right). \quad (14)$$

It is obvious from (14) that the amplification of helicons is possible if the beam velocity along the constant

magnetic field exceeds the phase velocity of the wave in the same direction. Thus, the energy loss of a particle moving along a helical line relative to a constant magnetic field is equivalent to the energy loss of a magnetic dipole spent for the excitation of helicons. In this case, the dipole moves along H_0 .

This mechanism underlies the drainless damping (amplification) of helicons.

Analysis

It was shown in [9] that the radiation of helicons is small in comparison to the radiation of the charge. Indeed, in a quantizing magnetic field, when the transverse energy of the oscillator is equal $\hbar\omega_H/2$, the magnitude of the magnetic moment is equal to Bohr magneton $e\hbar/2mc = 10^{-29}$ erg/g and is negligible in comparison with its value in classical case

$$M_{0z} = mv_\phi^2 / (2H_0) \approx 10^{-14} \text{ erg/g},$$

where $v_\phi \approx 10^8$ sm/s, $H_0 \approx 10^3$ E.

For an electron bunch in the form of a sphere with radius of $a = 10^{-1}$ cm, with current density $j \sim 100$ A/cm²,

($v_0 = 3 \cdot 10^9$ cm/s, $n_0 \sim 10^{11}$ cm⁻³), energy losses for helicon excitation ($\omega \sim 10^{10}$ s⁻¹, $q \sim 3$ cm⁻¹) are equal to $\left| \frac{d\varepsilon}{dt} \right| = 10^{-2} (q_0 R)^4$ W when $q_0 R \sim 10^{-1}$ $\left| \frac{d\varepsilon}{dt} \right| \sim 1$ μ W.

Conclusions

The research results revealing the mechanisms of interactions between charged particles and helicons, which has been obtained in this work can be useful in solving practical problems of radiophysics. This is due to a number of features of this kind of magnetoplasma oscillations. First, these waves exist in a wide frequency range, regardless of the ratio between the signal frequency and the collision frequency of charge carriers in classical and quantizing magnetic fields. Second, they have relatively low phase velocities and can interact with acoustic vibrations in semiconductors due to the inductive coupling of conduction electrons and the crystal lattice. And, finally, since the components of the magnetic field of the helicon are small in comparison with the electric field, then at the semiconductor-ferrite interface, coupled helicon-spin surface waves emerge, at certain frequency intervals, which can be used to filter electromagnetic oscillations.

REFERENCES

1. Beletsky, N.N., Svetlichny, V.M., Halameida, D.D. and Yakovenko, V.M. (1991), *Electromagnetic phenomena of the microwave - range in inhomogeneous semiconductor structures*, Naukova Dumka, Kyiv, 216 p.
2. Zee, C. (1984), *Physics of semiconductor devices*, Mir, Moscow, 456 p.
3. Mikhailov, M.I., Razumov, L.D. and Sokolov, S.A. (1979), *Electromagnetic effects on communication facilities*. Radio and communication, Moscow, 225 p.
4. Steele, M., and Vural, B. (1973), *Interaction of waves in solid plasma*, Atomizdat, Moscow, 312 p.
5. Myrova, L.O. and Chepizhenko, A.Z. (1988), *Ensuring the resistance of communication equipment to ionizing electromagnetic radiation*. Radio and communication, Moscow, 235 p.
6. Kravchenko, V.I., Yakovenko, I.V. and Losev, F.V. (2012), "Excitation of electromagnetic oscillations in 2-D electronic structures by currents induced by external radiation", *Bulletin of NTU "KhPI"*, No. 21, pp. 154–161.
7. Kravchenko, V.I., Yakovenko, I.V. and Losev, F.V. (2012), "Generation of electromagnetic oscillations of a semiconductor structure under conditions of external electromagnetic influence", *Bulletin of NTU "KhPI"*, No. 21, pp. 161–169.
8. Kravchenko, V.I., Yakovenko, I.V. and Losev, F.V. (2013), "Influence of the flux of charged particles. Induced by external electromagnetic radiation on the waveguide characteristics of semiconductor components for electrical radio products", *Bulletin of NTU "KhPI"*, No. 27, pp. 83–89.
9. Kravchenko, V.I., Yakovenko, I.V. and Losev, F.V. (2013), "Kinetic mechanisms of interaction of surface vibrations with conduction electrons of semiconductor structures under the influence of external electromagnetic radiation", *Bulletin of NTU "KhPI"*, No. 27, pp. 103–111.

Received (Надійшла) 15.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Серков Олександр Анатолійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри систем інформації, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Aleksandr Serkov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Information Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e mail: saa@kpi.kharkov.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6446-5523>.

Бреславець Віталій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри систем інформації, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Breslavets Vitaliy – candidate of technical sciences, Associate Professor, Professor of Information Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e mail: bres123@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9954-159X>.

Яковенко Ігор Володимирович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри систем інформації, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Yakovenko Igor – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Professor of Information Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e mail: yakovenko60iv@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0963-4347>.

Фоменко Андрій Анатолійович – старший викладач кафедри систем інформації, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Fomenko Andrii – Senior Lecturer of Information Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: fomenkoandrey1978@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7718-5419>.

Збудження магнітоплазмових коливань у напівпровідникових структурах потоками заряджених часток

О. А. Серков, В. С. Бреславец, І. В. Яковенко, А. А. Фоменко

Анотація. Предмет дослідження – процеси аналізу та фізичної моделі збудження (посилення) магнітоплазменних колес (геліконов) потоків заряджених частин (електронів) при наявності постійного магнітного поля. Данна модель базується на черенківському механізмі перетворення кінетичної енергії частинок на енергію власних електромагнітних колекторів твердотільних (напівпровідникових) структур в умовах резонансу, коли швидкість частки та фазові швидкості коливань співпадають. **Мета статті** – обґрунтування постановки теоретичних досліджень на базі запропонованої фізичної моделі генерації (посилення) електромагнітних коливань (появи нестійкостей коливань, тобто експоненціального поста їх амплітуди). Визначено області параметрів зовнішнього магнітного поля, потоків частинок і типів напівпровідникових структур, при яких реалізується дана фізична модель. Проведено теоретичні дослідження впливу потоків заряджених частинок на хвильові характеристики напівпровідникових структур. Вони показали можливість генерації та посилення магнітоплазмових коливань субміліметрового діапазону. **Завдання:** теоретичні дослідження взаємодії рухомих зарядів з електромагнітними коливаннями напівпровідникової структури в умовах черенковського випромінювання. **Методи досліджень:** метод послідовних наближень рішення дисперсійних рівнянь системи потік заряджених частинок – напівпровідникова структура в рамках гідродинамічного підходу. **Результати досліджень.** Проведено теоретичні дослідження функціонування напівпровідникових комплектуючих електрорадіовиробів при наявності потоків заряджених частинок. Показано, що вплив потоку частинок характеризується виникненням нестійкостей коливань напівпровідникової структури. Визначено один з механізмів порушення магнітоплазмових коливань, заснований на взаємодії рухомих зарядів, з власними полями структур, комплектуючих напівпровідниковий виріб. Подібні відмови реалізуються в умовах черенковського випромінювання. Показано, що дана взаємодія проводить до появи режиму генерації коливань. Результати порівняльного аналізу, отриманих в даній роботі розрахункових даних, дозволяють використовувати запропоновану фізичну модель для визначення критеріїв виникнення і розвитку нестійкостей магнітоплазмових коливань. **Висновки.** Результати, отримані в роботі, можуть бути використані при розробці активних приладів НВЧ-діапазону (підсилювачів, генераторів і перетворювачів електромагнітних коливань міліметрового та субміліметрового діапазонів). Проведений в роботі порівняльний аналіз кількісних оцінок інкрементів нестійкостей коливань в залежності від просторової конфігурації впливає поля (наведений струм паралельний кордоні структури) дозволяє вирішувати задачі оптимізації робочих характеристик активних приладів НВЧ-діапазону.

Ключові слова: потік заряджених частинок; електромагнітне випромінювання; напівпровідникові структури; поверхневі коливання; інкремент нестійкості коливань.

Возбуждение магнітоплазменных колебаний в полупроводниковых структурах потоками заряженных частиц

А. А. Серков, В. С. Бреславец, И. В. Яковенко, А. А. Фоменко

Аннотация. Предмет исследования – процессы анализа и физическая модель возбуждения (усиления) магнітоплазменных колебаний (геликонов) потоками заряженных частиц (электронов) при наличии постоянного магнітного поля. Данная модель базируется на черенковском механизме преобразования кинетической энергии частиц в энергию собственных электромагнитных колебаний твердотельных (полупроводниковых) структур в условиях резонанса, когда скорости частиц и фазовые скорости колебаний совпадают. **Цель статьи** – обоснование постановки теоретических исследований на базе предложенной физической модели генерации (усиления) электромагнитных колебаний (появления неустойчивостей колебаний, т.е. экспоненциального поста их амплитуды). Определены области параметров внешнего магнітного поля, потоков частиц и типов полупроводниковых структур при которых реализуется данная физическая модель. Проведены теоретические исследования влияния потоков заряженных частиц на волноводные характеристики полупроводниковых структур. Они показали возможность генерации и усиления магнітоплазменных колебаний субмиллиметрового диапазона. **Задача:** теоретическое исследование взаимодействия движущихся зарядов с электромагнитными колебаниями полупроводниковой структуры в условиях черенковского излучения. **Методы исследований:** метод последовательных приближений решения дисперсионных уравнений системы поток заряженных частиц – полупроводниковая структура в рамках гидродинамического подхода. **Результаты исследований.** Проведены теоретические исследования функционирования полупроводниковых комплекующих электрорадионизделий при наличии потоков заряженных частиц. Показано, что влияние потока частиц характеризуется возникновением неустойчивостей колебаний полупроводниковой структуры. Определен один из механизмов возбуждения магнітоплазменных колебаний, основанный на взаимодействии движущихся зарядов, с собственными полями структур, комплекующих полупроводниковое изделие. Подобные отказы реализуются в условиях черенковского излучения. Показано, что данное взаимодействие приводит к появлению режима генерации колебаний. Результаты сравнительного анализа, полученных в настоящей работе расчетных данных, позволяют использовать предложенную физическую модель для определения критериев возникновения и развития неустойчивостей магнітоплазменных колебаний. **Выводы.** Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при разработке активных приборов СВЧ –диапазона (усилителей, генераторов и преобразователей электромагнитных колебаний миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов). Проведенный в работе сравнительный анализ количественных оценок инкрементов неустойчивостей колебаний в зависимости от пространственной конфигурации воздействующего поля (наведенный ток параллелен границе структуры) позволяет решать задачи оптимизации рабочих характеристик активных приборов СВЧ –диапазона.

Ключевые слова: поток заряженных частиц; электромагнитное излучение; полупроводниковые структуры; поверхностные колебания; инкремент неустойчивости колебаний.